



セルフパワード・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電に関する研究

著者	山本 雄大
号	62
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5447号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00124767

氏 名	やまもと ゆう た 山 本 雄 大
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成30年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
学 位 論 文 題 目	セルフパワード・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電に関する研究
指 導 教 員	東北大学准教授 榎原 幹十朗
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 福永 久雄 東北大学教授 岡部 朋永 東北大学教授 吉田 和哉 東北大学准教授 榎原 幹十朗

論 文 内 容 要 旨

構造物の振動エネルギーから電気エネルギーを創出する振動エネルギーハーベスティング技術は、環境への負荷が小さく局所的な発電が可能な、新しいエネルギー源として期待が高まっている。同時に、与えられる振動エネルギーに対してより大きな電気エネルギーを得られるような、発電効率の高い振動発電手法が求められている。

自動車や航空機、建築物、橋梁といった構造物は、常に機械振動や自然風に晒されており、振動が励起されやすい。これらの振動は、機械性能の低下や構造物の早期劣化を招くため、従来は発生を避けるべき対象として扱われてきた。一方で、振動エネルギーハーベスティングは、振動の持つ機械エネルギーを有用な電気エネルギーへと変換し利用する事を目指すものである。ハーベスティングによって得られた電力は、現在使用されている化学電池の代用として利用が可能であり、照明や非常時の電源として、また無線送信器の駆動電力として各種センサ情報の計測・伝達に活用されることが期待されている。近年、第四次産業革命の一端として述べられている IoT (Internet of Things: モノのインターネット) 構想では、従来の情報機器だけでなく、家電、センサ、工場生産設備、移動体である自動車・航空機・ロボットなどあらゆる「モノ」をインターネットで繋ぐ。有線ケーブルに頼らない独立・孤立した「モノ」の遠隔通信が想定されており、その中核となる技術は、自立電源を持つ無線センサ端末である。また、航空宇宙構造物に対し、機体を構成する構造部材に圧電素子を埋め込むことで電力を獲得し、その電力で分散したワイヤレスセンサネットワークを構築する構想がある。このワイヤレスセンサネットワークにより、機体周りの温度や圧力、振動状態の情報を運用中に収集することで、機体の健全性を常時監視する構造ヘルスマモニタリングが可能となる。構造ヘルスマモニタリングは航空宇宙機に限らず、車や電車、橋梁などの地上構造物にも幅広く適用が期待されている。

スタンダードハーベスティング手法は、振動エネルギーハーベスティングにおいて最も一般的なハーベスタ回路である。この回路を構成する電気素子はすべて受動素子のみであるために、どのような振動に対しても安定し

た電気エネルギーの回収が可能であり、動作不良の心配が少ない。一方で、スタンダードハーベスティング手法では、発生電圧が構造物の振動振幅によって決定されるために発電効率が低く、振動発電手法としての発電効率向上が見込めないという点が課題となっていた。一方、SSHI手法に代表されるスイッチ式振動発電は、発電効率を能動的に向上させることの出来る画期的な手法である。スイッチ式振動発電では、主構造物やエネルギー変換器である圧電素子に一切の手を加えることなく、ハーベスタ回路にスイッチとその制御回路を加えるのみで発電量が向上する。

しかしながら、従来のスイッチ式振動発電手法にはいくつかの問題点が見られた。一つ目の問題点は、スイッチを操作する制御器をハーベスティングシステムの一部として考えず、外部装置とみなしていた点である。構造物の変位を計測しスイッチを制御する制御器は、外部の電源を使用して駆動されていた。これでは、独立した発電器として利用されるはずの振動発電器としての本分を果たせない。また、二つ目の問題点は、スイッチを操作するタイミングを決定するスイッチ制御則が単振動のみを対象としていた点である。過去の研究では、構造物が正弦波振動している状態を想定し、構造物の振動変位が頂点となるタイミングでスイッチを操作するスイッチ制御則が提案された。しかし、現実の構造物は複数の振動モードが混ざり合った多モードで振動することが想定される。従来のスイッチ制御則では、このような多モード振動に対して、有効なスイッチ操作のタイミングを導くことはできなかった。

そこで、本研究では外部から完全に独立した状態で自立駆動し、かつ高い発電効率を実現する新たなスイッチ式振動発電手法を構築する事を目的とする。以下に具体的な本研究の3つの目的を述べる。

本研究の第1目的は、「外部の制御装置に依存しないセルフパワード・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電システムを構築すること」である。振動発電器は、発電手法の達成に必要な消費電力を自ら賄いながら、デバイス全体がセルフパワードで駆動することが必要である。すなわち、スイッチ式振動発電を達成するための変位計測やスイッチ制御に必要な電力の収支が、すべて閉じられた発電システムの中で完結しなくてはならない。そこで本研究では、汎用的なマイクロプロセッサをハーベスタ回路に導入し、振動エネルギーハーベスティングによって獲得した電気エネルギーの一部をプロセッサへと供給したセルフパワード・デジタル制御器を提案する。これにより、外部の電力に依存しない完全に閉じられたシステムによるスイッチ式振動発電を実現する。スイッチ式振動発電のエネルギー回収回路としては並列SSHI回路を使用する。並列SSHI回路は、スイッチが駆動されないスイッチ off の状態で、パッシブ駆動可能なスタンダードハーベスティングと等価な回路となる。このことから、並列SSHI回路を使用することで、振動が励起された直後は、プロセッサの動作なしにエネルギーを回収することが可能であり、予備充電の必要のない独立した電源としての駆動を可能とする。

本研究の第2目的は、「多モード振動に対するスイッチ式振動発電のスイッチ制御則を導き、混合モード振動条件下での発電効率を向上すること」である。従来のスイッチ式振動発電では、単モード振動に対するスイッチ制御則のみが提案されており、多モード振動に対する有効なスイッチ制御則は考えられていなかった。本研究では、

現代制御の状態空間法を用いたフィードバック制御に基づくスイッチ制御則を提案する。状態空間法を用いることで、振動モード分解、多モード振動の推定、多モード振動に対する制御を導入することが可能であり、多自由度振動に対する効率的な発電を導くことができる。セルフパワード・デジタル制御器はプロセッサを有することから、デジタルな数値の演算が可能である。そのため、複数の振動モード状態量に基づくスイッチの制御という、従来のスイッチ式振動発電にはなかった制御メカニズムの導入が可能となる。

さらに、本研究の第3目的として、「センサを必要としないセンサレスなスイッチ式振動発電手法を構築すること」を挙げる。従来のスイッチ式振動発電では、振動する構造物の振動状態を把握するために、必ず変位計や加速度計、歪計などの観測センサを必要としていた。このことは、スタンダードハーベスティングと比較すると、設置時にエネルギー変換用の圧電素子に加えて観測センサを設置する必要がある、利便性に欠ける。そこで、本研究では、エネルギー変換素子として用いている圧電素子の両端子間電圧（以下、圧電電圧と呼ぶ）を計測することにより、振動状態を推定するセルフセンシング状態観測手法を提案する。これにより、変位センサを用いずとも、振動構造物の状態量を獲得し、それに基づくスイッチのフィードバック制御が可能となる。

本研究では、以上の3つの目的を達成することにより、外部から完全に独立した状態で駆動し、かつ高い発電効率を実現するスイッチ式振動発電手法を実現する。

第1章では、緒言として振動エネルギーハーベスティングの概要と、従来研究としてハーベスタ回路の改善と効率化に関する研究、振動発電デバイスのセルフパワード化に関する研究、圧電アクチュエータのセルフセンシング化に関する研究についてまとめた。

第2章では、多モード振動にも対するスイッチ振動発電のためのスイッチ制御則を構築した。まず、従来手法であるスタンダードハーベスティングとスイッチ式振動発電のひとつである並列 SSHI 手法についてそれぞれの回路構成を比較した。スタンダードハーベスティングは回路を構成する電気素子の全てが受動素子であり、どのような構造物の振動状態においても安定した発電が可能である。一方で並列 SSHI 手法は、構造物の振動が極大となるタイミングでスイッチの操作を行うことで、振動エネルギーからの電気エネルギーの回収効率を向上させることができる。圧電素子内の蓄積電荷を変化させるための電荷反転回路の動作について詳細を述べ、スイッチのオン・オフ操作により圧電素子の蓄積電荷を反転増幅できることを示した。その上で、振動構造物として多自由度構造物を想定し、多モード振動に対するスイッチ振動エネルギーハーベスティングのスイッチ制御則を導いた。

第3章では、セルフパワード・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電手法の動作原理と具体的なハーベスタ回路構成について述べた。本制御器は、スタンダードハーベスティング状態からスイッチハーベスティング状態へと移行する段階を踏むことで、無電源状態からのコールドスタートが可能である。自立したスイッチ制御により外部装置のない独立した環境において高い発電効率を実現する。ハーベスタ回路を構成する各電気素子について、それぞれの役割と設計時に留意すべき点をまとめた。構築したセルフパワード・デジタル制御器を

用いて、2 自由度の実験構造物における振動発電実験を行った。ハーベスタ回路としてスタンダードハーベスティング手法とセルフパワー・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電の2 種類を用いて実験を行い、結果を比較した。蓄積キャパシタに対する充電性能、負荷抵抗に対する定常供給電力、入力パワーに対するパワー効率の3 つの実験においてセルフパワー・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電の発電性能を評価した。実験により、単モード振動と複数の振動モードが混在した混合モード振動の双方において、提案手法による発電性能の向上が可能であることが確認された。

第4 章では、圧電トランスデューサが発生する圧電電圧の計測により、構造物の振動状態を推定するセルフセンシング手法を提案した。スイッチ式振動発電のハーベスタ回路はスイッチとダイオードブリッジの状態に応じて、3 つの回路状態をとる。そこで、それぞれの回路状態について機械的な運動のみを表す運動方程式と電気的挙動を表す回路方程式を結合したハーベスティングシステム全体の状態方程式を導出し、状態観測器の設計を行った。それぞれの回路状態に対し、対応する状態観測器を交互に用いることで、連続した状態推定を行った。これにより、圧電電圧を観測量とした状態推定が可能となり、センサレスでのスイッチ式振動発電が達成される。数値シミュレーションと実験においてセルフセンシング状態推定法の検討を行い、変位センサを用いずにスイッチ式振動発電を実行できることが実験により確かめられた。

第5 章では、結言としてセルフパワー・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電に関して本研究で得られた知見をまとめた。

論文審査結果の要旨

人間が航空機もしくは宇宙機を用いることで到達可能である空中や宇宙という環境は、地表に比べてエネルギーの乏しい環境である。限られたエネルギーを如何に無駄なく有効に利用するかが、航空宇宙における人類活動の将来性に大きな影響を与える。航空宇宙工学をはじめ機械工学の進歩のためには、エネルギー生産手法の多様化と生産効率の向上が必要である。本研究は、振動する構造物から電気エネルギーを回収する振動発電において発電効率を向上する目的で、セルフパワード・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電手法を検討したものである。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編5章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、複数の振動モードが重畳する混合モード振動にも適用可能な発電制御則を論じている。圧電素子内の蓄積電荷を変化させる電荷反転回路の詳細を述べ、スイッチ操作のみにより圧電電荷を効果的に反転増幅できることを示している。その上で、多自由度構造物の混合モード振動にも対応するスイッチ制御則を提案している。これは、汎用的な発電制御則の導出法を提示しており、振動発電の適用範囲を拡大させる重要な成果である。

第3章では、セルフパワード・デジタル制御器を用いたスイッチ式振動発電手法の動作原理と具体的な発電回路構成を論じている。提案概念を具現化したセルフパワード・デジタル制御器を搭載した振動発電器を用いた振動発電実験を行っている。蓄積キャパシタに対する充電性能、負荷抵抗に対する定常供給電力、入力パワーに対するパワー効率の3種類の発電実験において発電性能を評価している。単モード振動と混合モード振動の両方において、提案発電器の発電性能が従来発電器の性能を凌駕することを実証している。これは、振動発電の新規概念を提示するものであり、新規研究分野を開拓しているという観点からも重要な成果である。

第4章では、センサを用いずに発電するセルフセンシング振動発電を提案している。スイッチ式振動発電のスイッチ操作を行わない間に圧電電荷が一定値と成り得る事を見出し、圧電電荷を含めた拡大系状態観測器を構築することを提案している。さらに、発電回路の導通状態に応じて複数の状態観測器を使い分けることで、センサを用いずにスイッチ式振動発電を実行できることを実証している。これは、スイッチ式振動発電の実用に向けた有用な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、混合モード振動にも適用できる振動発電制御を構築し、セルフパワード・スイッチ式振動発電とセルフセンシング振動発電を開発し、それらの特徴と性能を詳細に論じたものであり、航空宇宙工学および機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。